

# 空気と粒子が混合した流れ

物質工学科 城野祐生

## 1. はじめに

皆さんにとって「混相流」とは聞き慣れない言葉かも知れません。ご存知の通り物質はその形態によって「固体」「液体」「気体」の3つの状態に分類できますが、実際の物質の流れを詳しく観察すると、これら3つの状態の物質がそれぞれ単独に存在する場合よりもむしろそれらが種々の組み合わせで混じり合い、相互に影響を及ぼし合いながら複雑な流れを形作っていることが多いことに気がつくと思います。そのような異なる状態の物質が混じり合った流れを「混相流」と言います。今回は混相流の中でも主に固体粒子と空気の混合した流れである「固気混相流」の数値シミュレーションについて簡単に紹介したいと思います。

## 2. 固体粒子と空気が混合した流れ（「固気混相流」）の数値シミュレーション

### 2.1 数値シミュレーションの意義

「数値シミュレーション」という言葉を調べてみると「対象とする現象を支配する種々の物理的な法則を考慮して数値計算を行い実際の現象を予測する技術」という説明があります。数値シミュレーションには、熟練技術者によって長年に渡って蓄積された経験や職人的な勘に頼って行われてきた機器・装置の設計や運転などの最適化を論理的に明確にしながらいふことができる、通常の方法では実験や測定を行うことが困難な現象についても計算結果から種々のデータを得ることができるといった様々な利点があるためいろいろな分野で注目されています。その中でも流体や粒子の複雑な現象を取り扱う計算機シミュレーションは最先端技術の一つとして現在脚光を浴びています。

### 2.2 「固気混相流」の流れの分類とその計算方法

「固気混相流」の流れを濃度ごとに分類し、それらの流れの特徴と計算方法の概略をまとめると以下ようになります。

#### (1) 空気だけの場合（気流の乱流）

粒子がない空気だけの場合と言っても、その流れを計算によって求めることは簡単ではありません。空気の流れは、流れが非常にゆっくりとした場合を除き、通常の状態では「乱流」と呼ばれる流れの向きや速度が空間的・時間的に複雑に変化する不規則な流れになっています。コンピュータが発達するごく最近までは空気のみ流れを計算によって求めることさえ大変難しいことでした。物理的な法則に基づいて空気の複雑な流れを計算によって求めることが可能になって初めて、それを利用して以下の(2)～(5)のような粒子を含む流れの計算もできるようになりました。

#### (2) 粒子濃度が非常に低い場合（煙霧、粉塵など）

空気の流れの中にある粒子は流れから力を受けて運動しています。粒子が流れから受ける力には例えば、粒子が風下方向へ押される力（「抗力」）、粒子が回転している場合に流れの向きと直角に作用する力（「回転揚力」= 回転を加えて投げたボールがカーブする様子を想像してください）等があり、

粒子の運動はそれらを考慮して計算します。このとき気流の運動も計算によって求めるわけですが、粒子濃度が非常に低い場合には、粒子が空気の流れに及ぼす影響はほとんど無視できるので、空気の流れは空気のみの場合と同じと考えて計算することが可能です。

(3) 粒子濃度が低い場合 (エンジンやボイラの燃料噴射など)

空気の流れの中にある粒子の運動は(2)の場合と同様にして計算します。ただし粒子濃度が徐々に高くなって流れに含まれる粒子の体積が空気の数万分の一以上になると粒子が空気の流れに影響を及ぼし始めるため、粒子に作用する力と逆向きの力が空気の流れに作用すること(作用・反作用の法則)を考慮して空気の流れを計算することが必要になります。従って、この場合には空気の流れと粒子の運動は相互に影響し合っており、両者の運動は連立方程式を解くようにして答えを求める必要があります(以下の(4)と(5)の場合も同じです)。

(4) 粒子濃度が高い場合 (高速の気流による粒子の流動化状態、粒子の空気輸送など)

さらに粒子の濃度が高くなると、上述の(3)までの事柄に加えて粒子の運動に粒子どうしの衝突・接触による影響が現れるため、それらを考慮することが必要となります。ただし、それぞれの粒子どうしの平均的な距離が比較的離れている場合には同時に3個以上の粒子が衝突する確率は低いと考えられるので、粒子どうしの衝突を1対1として取り扱うことが可能です。

(5) 粒子濃度が非常に高い場合 (低速の気流による粒子の流動化状態、粉体層の流動など)

非常に粒子の濃度が高い場合には1個1個の粒子に対して常に多数の粒子が同時に接触するようになり、粒子どうしの衝突を1対1に限定して考えることが不可能となります。従って、この場合の計算は(4)の場合よりもさらに面倒になり、各粒子周りの接触点1つ1つで作用している力を計算し、それらを合計することによって各粒子に作用する粒子どうしの接触力の影響を求めて個々の粒子の運動を計算することが必要となります。

### 3. おわりに

「固気混相流」の数値シミュレーションについて簡単に紹介しました。固体粒子と空気が混合した流れの様子はそこに含まれる固体粒子の濃度によって大きく変化するため、それぞれの場合によって計算方法も使い分ける必要があります。固気混相流数値シミュレーションの結果の一例を Fig.1 に示します。粉体を堆積させた容器の底面部から気流を流入させて粉体中に気泡が発生しながら流動化する気泡流動層を数値シミュレーションしたもので、2.2では(5)に分類されます。Fig.1(a)の数値シミュレーションでは約10万個の粒子の運動を粒子1個1個に着目して計算しています。

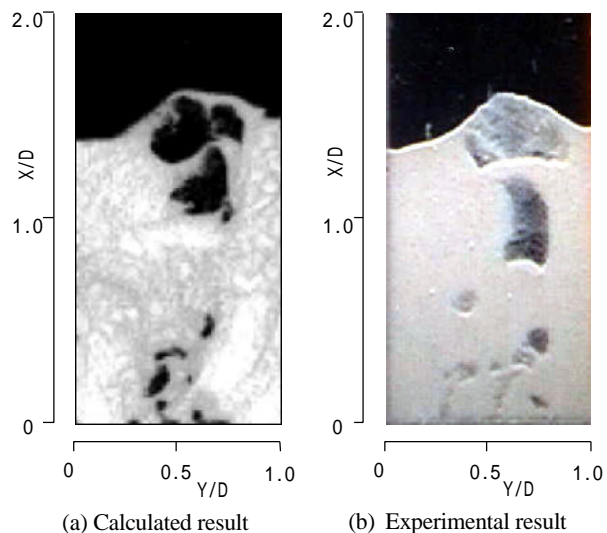


Fig.1 Calculated instantaneous void fraction contour and experimental snapshot of the fluidized bed.